

枯水季“引江济太”对受水河湖水体磷素分布影响*

李馨雅¹, 吴修锋^{1, 2}, 戴江玉^{1, 2, 3**}, 吴时强^{1, 2}, 刘倩倩¹, 程旭¹, 钟优¹

(1:南京水利科学研究所, 南京 210029)

(2:水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029)

(3:水利部太湖流域浅水湖泊生态系统野外科学观测研究站, 无锡 214024)

摘要: 本研究以改善太湖水环境的“引江济太”调水工程为背景, 聚焦于其对太湖磷素特别是生物有效磷的输入贡献及与藻华风险的潜在关联。选取望虞河引水通道及受水区贡湖湾为重点研究区域, 并以太湖湖心区作为对照, 于 2018 - 2022 年枯水期(秋、冬季)开展野外调查, 监测总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性反应磷(SRP)、叶绿素 a(Chl.a)等环境因子, 推算出颗粒态磷(PP)和溶解性有机磷(DOP), 进而通过统计分析评估引水对磷素分布的影响及其与藻类生长的关系。结果表明: 秋季引水期间, 望虞河自长江至入湖口磷素呈沿程递减趋势, 冬季则波动上升; 从贡湖湾向湖心区方向, TP、DTP、SRP 和 DOP 在引水期与非引水期均表现为波动上升态势。引水期贡湖湾 PP 占比在秋、冬季分别为 47.0%和 31.5%, 高于非引水期(37.33%和 20.16%), 但望虞河入湖磷素浓度总体与湖心区相当甚至更低, 表明枯季引水未显著增加贡湖湾磷素负荷, 尤其对溶解态生物有效磷影响有限。相关性分析显示, 秋季引水期贡湖湾 Chl.a 与水温、浊度相关, 冬季则与溶解氧(DO)、pH 显著相关, 未发现 Chl.a 与各形态磷具有显著相关性。综上所述, 在望虞河西控工程调控下, 枯季“引江济太”引水不会显著增加受水湖区磷素负荷, 尤其对浮游藻类直接利用的生物有效磷输入有限, 贡湖湾藻类生长对磷素响应不敏感。尽管如此, 引水输入磷的长期累积效应及其对藻华暴发的潜在影响仍需持续关注与深入研究。

关键词: 引江济太; 枯水期; 望虞河; 贡湖湾; 磷素

Impact of Dry-Season Water Diversion from Yangtze River to Lake Taihu on Phosphorus Distribution in Water-Receiving Areas

Xinya Li¹, Xiufeng Wu^{1, 2}, Jiangyu Dai^{1, 2, 3**}, Shiqiang Wu^{1, 2}, Qianqian Liu¹, Xu Cheng¹, You Zhong¹

(1: Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China)

(2: The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, P. R. China)

(3: Taihu Basin Shallow Lake Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Water Resources, Wuxi 214024, P. R. China)

Abstract: The Water Diversion from Yangtze River to Lake Taihu (WDYT) is a major engineered water transfer project designed to improve the water quality of Lake Taihu. However, its impact on lake phosphorus dynamics, especially the contribution of bioavailable phosphorus and its linkage to algal bloom risk, remains inadequately understood. This study aimed to evaluate the degree and contribution of the WDYT to phosphorus variations in Lake Taihu and to examine its association

*2025-09-29 收稿; 2025-12-04 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52179073)、水利部重大科技项目(SKS-2022059)、南京水利科学研究所基金项目(Y124001; Y124020)联合资助。

**通信作者; E-mail: jydai@nhri.cn

with algal bloom potential. Focusing on the Wangyu River diversion channel and the receiving Gonghu Bay, with the central lake zone as a reference area, field sampling was conducted during dry seasons (autumn and winter) from 2018 to 2022. Parameters monitored included total phosphorus (TP), total dissolved phosphorus (DTP), soluble reactive phosphorus (SRP), chlorophyll-a (Chl.a), and other physicochemical factors; particulate phosphorus (PP) and dissolved organic phosphorus (DOP) were derived. Statistical analyses were employed to assess the influence of water diversion on aquatic phosphorus forms and its correlation with algal indicators. Results indicated that phosphorus concentrations in the Wangyu River decreased along the flow path from the Yangtze River to the lake inlet during autumn diversion periods, whereas they fluctuated and increased overall in winter. From Gonghu Bay toward the central lake, concentrations of TP, DTP, SRP, and DOP showed fluctuating yet generally increasing trends during both diversion and non-diversion periods in autumn and winter. The average proportion of PP in Gonghu Bay during diversion periods was 47.0% in autumn and 31.5% in winter, higher than during non-diversion periods (37.33% and 20.16%, respectively). Nevertheless, phosphorus concentrations in the Wangyu River inflow were generally similar to or lower than those in the central lake zone. Dry-season diversion did not significantly increase phosphorus levels in Gonghu Bay, particularly dissolved bioavailable phosphorus. Chl.a in Gonghu Bay correlated with water temperature and turbidity in autumn, whereas it was significantly associated with DO and pH in winter. No significant correlation was found between Chl.a and phosphorus concentrations. Under the operation of the Wangyu River western control project, dry-season diversion does not substantially raise the phosphorus load in the receiving lake area, especially regarding dissolved bioavailable phosphorus directly available to phytoplankton. Thus, phytoplankton growth in Gonghu Bay during the dry season is not sensitive to phosphorus concentrations. Although the phosphorus introduced via diversion shows limited short-term ecological effects, its long-term accumulation and potential role in promoting algal blooms in Lake Taihu require further investigation.

Keywords: Water Diversion from Yangtze River to Lake Taihu (WDYT) ; dry season ; Wangyu River ; Gonghu Bay ; Phosphorus

气候变化与人类活动影响下，浅水湖泊富营养化问题尤为突出^[1]，蓝藻水华灾害频发^[2]，水安全保障功能难以充分发挥。磷是浅水湖泊生态系统中最重要生源要素之一，也是湖泊富营养化与藻类增殖的主要限制因子^[3]，这使得“控磷”一直被认为是湖泊富营养化重要的管控策略^[5]。作为流域水安全保障的重要工程措施，调水工程为浅水湖泊富营养化及其生态风险治理提供了有效途径^[6]。但由于我国地表水环境质量标准中河流水体总磷的控制标准明显低于湖、库同类标准，河流水体总磷浓度水平通常高于湖泊。加之河流水体对陆域面源污染的直接接纳及较高的泥沙含量，使得江河水体中磷素的含量与形态结构往往有别于湖泊^{[10][11]}。因此，调水工程对受水浅水湖泊水体磷素的影响不容忽视。

调水工程对受水河湖水体磷素的影响与外源输入等因素密切相关。当调水水源区磷素含量等水质状况优于受水区，调水往往可有效降低受水区水体总磷（Total Phosphorus, TP）等水质指标含量，进而改善河湖受水区富营养化状况及浮游藻类群落^{[12][14]}。而我国江河水体总磷含量往往高于湖库，调水工程如“引江济太”“引江济巢”、南水北调东线工程等，对受水浅水湖泊水体磷素的影响及其生态风险备受关注^[15]，引发了针对调水工程导致磷素输入风险的讨论^[19]，成为制约工程综合效益发挥的重要因素。然而，现有研究多关注调水工程对受水湖区总磷（TP）输入通量的影响^{[20][23]}，但对磷酸盐、溶解性有机磷等形态生物有效磷（Bioavailable Phosphorus, BAP）的影响仍缺乏深入认识，而这与受水浅水湖泊的藻类等生态风险直接密切相关。

引江济太工程是改善太湖流域及区域水体流动、增强太湖水环境容量、提升藻华风险防控能力的流域性调水工程。受长江与望虞河沿线支流影响，该工程入湖水体总磷含量往往高于太湖，对太湖水体磷素循环及生态的影响备受争议^{[24][25]}。调水活动多集中于秋、冬枯水期，太湖流域进入枯水期后，水位和流量持续走低，水体扩散能力减弱^[26]。相较于丰水期，枯水期流域内径流贡献减少，望虞河引江水量在受水河湖中占比提升，使得引水的外源输入效应更为凸显，尤其是对受水河湖磷素赋存的影响较丰水期可能更为明显。聚焦此，本研究聚 2018-2022 年的枯水季（秋、冬季），重点关注溶解性总磷（Dissolved

Total Phosphorus, DTP)、溶解性反应磷 (Soluble Reactive Phosphorus, SRP) 以及溶解性有机磷 (Dissolved Organophosphorus, DOP), 通过对枯水期调水与非调水期望虞河与太湖受水湖区磷素的野外监测与对比分析, 解析枯水期望虞河和太湖受水湖区水体多形态磷素的空间分布特征, 阐明枯水期调水对受水湖区水体多形态磷素的影响及其与藻华风险的关联。为引江济太工程外源磷素污染及其湖泊生态风险防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点

太湖流域地处长江中下游地区, 贡湖湾位于太湖东北部, 水面积约 164km², 多年平均水深不超过 2m。贡湖湾地区属亚热带季风气候, 温暖湿润, 年平均气温 16~18℃, 年降水量 1100~1150mm^[27]。引江济太工程由常熟枢纽引长江水通过望虞河经望亭水利枢纽进入太湖, 引水河道望虞河南起太湖边沙墩口, 北至长江边的耿泾口^[28]。沿线经过苏州市相城区、无锡市新吴区、锡山区和常熟市, 全长 62.3km, 其中河道段 60.3km、入湖段 0.9km、入江段 1.1km^[29]。两岸河网密布, 是引江济太工程主要的引排水通道之一。常熟水利枢纽和望亭水利枢纽是望虞河主干道河段的两个控制断面, 其中望亭水利枢纽是望虞河引水入湖的直接控制闸。望虞河东岸支流口门已基本控制, 西岸支流口门为兼排地区涝水, 仅北部靠近长江的福山塘以北段和南部嘉菱荡以南部分支流控制外, 其余均为敞开。调水过程中, 望虞河东岸闸门的引水流量以不得超过引江水量的 30%或最大引水流量不超过 40 m³/s 控制, 望虞河常熟枢纽调引的长江水绝大部分流入太湖和西岸支流^[30]。

引江济太工程受水湖区贡湖湾是太湖 (30°55'40"-31°32'58"N, 119°52'32"-120°36'10"E) 东北部的大型湖湾型水域, 水域面积约为 163km², 是无锡市重要的水源地, 东北与望虞河相连, 是出入太湖流域河流与太湖湖区进行物质能量交换、污染物输入与输出的重要水域, 同时更是引江济太工程长江来水进入太湖的最直接受水区, 是工程生态响应最具敏感性的水域^[30]。本文选取望虞河、贡湖湾水域作为敏感受水水域, 以湖心区为贡湖湾受引水影响的对照湖区。本研究在望虞河设置 11 个采样点 (从长江到望虞河入湖口分别为 W1-W11), 贡湖湾布设 6 个监测点位 (G1-G6), 在湖心区布设 3 个监测点位 (C1-C3) 作为受水湖区的参考点 (图 1)。

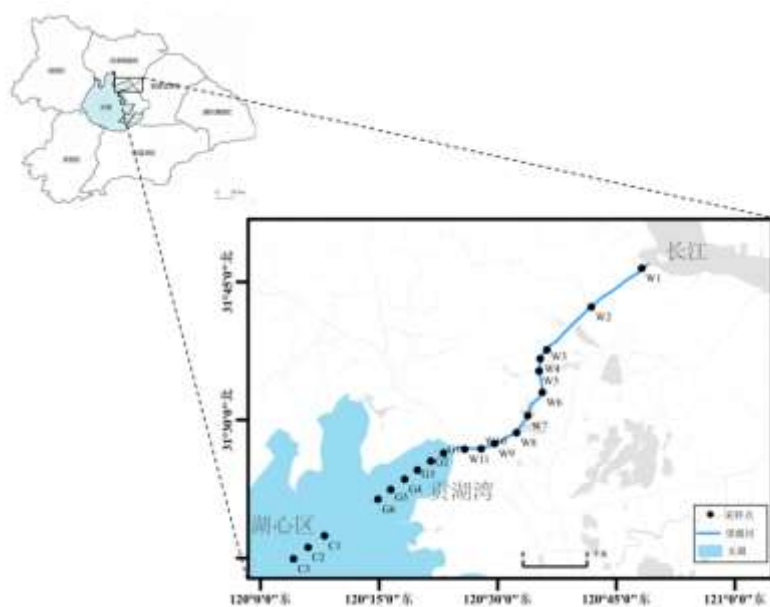


图 1 研究区域及采样点分布

Fig.1 Study area and distribution of sampling sites

1.2 样品采集

依据 2018—2022 年引江济太工程的运行情况, 引江济太调水时段多分布在秋、冬季节枯水期 (11 月

至次年2月)。本研究选取每年的秋季、冬季进行现场观测与样品采集,具体采集时间为2018年11月14日、2019年1月25日、2019年12月3日、2020年1月7日、2020年12月5日、2022年1月20日,其中2019年1月25日、2020年12月5日望虞河无引水入湖活动,其余监测时间均处于望虞河引水入湖期。现场监测时间均从早上9:00开始。水样采集前,先使用哈希AP-2000便携式多参数水质分析仪(HACH,上海)测定监测点位水体水温、pH、溶解氧(DO)、浊度值。采用有机玻璃柱状采样器采集水面以下50cm水深的河流和湖泊水样,每个采样点采集1个混合样品,共计1L水样,收集在事先洗净的透明塑料瓶中,放入带有冰块的保温箱,运输至实验室,24h以内测定水体TP、DTP、SRP以及Chl a含量。原水样用孔径为0.45 μm 的GF/F玻璃纤维膜过滤,过滤后的水样用于测定DTP和SRP。TP、DTP和SRP的测定方法参照《湖泊富营养化调查规范》中的相关方法进行测定^[31],水体Chl.a含量采用热乙醇法测定^[32]。水体颗粒态磷(Particulate Phosphorus, PP)与DOP浓度均通过 ρ 差值计算得到,PP浓度计算公式为 $\rho(\text{PP})= \rho(\text{TP})- \rho(\text{DTP})$,DOP浓度计算公式为 $\rho(\text{DOP})= \rho(\text{DTP})- \rho(\text{SRP})$ 。

1.3 数据分析方法

采用数值统计软件SPSS 23.0(Statistical Package for the Social Sciences, IBM)中单因素方差分析(One-way ANOVA)与曼-惠特尼U检验(Mann-Whitney U)检验方法进行望虞河、贡湖湾以及太湖湖心区各监测指标空间差异,以及引水期与非引水期贡湖湾水环境参数差异的分析^[33]。采用皮尔逊相关系数进行相关性分析。数据分析与制图使用Origin 2024、ArcGIS 10.2以及R软件平台^[34]的ggplot2^[35]^[36]程序包等软件。

2 结果与讨论

2.1 受水河湖水体磷素空间分布

秋季引水期和非引水期望虞河水体TP(图2a)、SRP(图2b)、DTP(图2c)及DOP(图2d)浓度沿江边闸(W1)向望亭枢纽(W11)方向的变化存在波动,从W1到W11的下降幅度分别为TP:50.00%(2018.11.14)、20.36%(2019.12.3);SRP:40.00%(2018.11.14)、21.74%(2019.12.3);DTP:52.10%(2018.11.14)、19.17%(2019.12.3);DOP:69.39%(2018.11.14)、15.69%(2019.12.3)。所以沿程存在波动,但是入湖口处浓度均明显降低。从贡湖湾向湖心区方向,四种磷形态浓度在引水期和非引水期均表现为沿程波动变化,湖心区浓度均值高于贡湖湾,且这种空间差异在非引水期更为明显。秋季引水期,尽管望虞河沿程水体磷素浓度高于太湖湖区,但从望虞河监测点位W9至W11呈现有所下降,望亭枢纽处入湖水体(W11)总磷浓度(0.120~0.176mg/L)均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中河流水体水质III类标准($\text{TP} \leq 0.2 \text{ mg/L}$)(图2a),部分年份入湖水体总磷和溶解性磷素浓度达到甚至优于湖心区水平(图2)。望虞河作为引江济太工程的输水通道,沿线河道长、湖荡多,对长江来水及自身沿线汇入的污染物质具有一定程度的净化能力^[37],尤其是长江来水的泥沙含量相对较高,磷素在望虞河沿线的河道和湖荡中更易沉降和降解,造成了秋季引水期望虞河江边闸至望亭枢纽方向的各形态磷素浓度下降。外源磷素进入湖区后,受水体掺混影响,使得磷素浓度梯度现象并不明显,显著影响区域主要集中于河流入湖口附近水域。但在非引水期,贡湖湾水体主要受太湖内部磷循环过程主导更大。近年来,随着望虞河西岸控制工程的投入运行,望虞河沿线入河污染得到一定程度的控制^[38],使得部分年份引水期望虞河入湖水体总磷浓度达到甚至优于湖心区,这也是秋季引水期贡湖湾“四种形态”磷素浓度优于湖心区的重要原因。

冬季各形态磷素浓度的空间分布结果显示,引水期与非引水期望虞河水体TP(图3a)、SRP(图3b)、DTP(图3c)及DOP(图3d)浓度呈现相反的空间变化趋势,引水期总体呈上升趋势,而非引水期则波动下降(图3)。对于太湖水体,引水期贡湖湾(除点位G4和G5)水体各形态磷素含量与湖心区无显著差异(One-way ANOVA, $p>0.05$),而非引水期水体各形态磷素从贡湖湾至湖心区呈现递减的空间分布趋势。引水期望亭枢纽处水体各形态磷素浓度均达到或低于太湖湖心区(图3)。与秋季引水期不同的是,冬季引水期望虞河水体磷素浓度从江边闸至望亭枢纽呈现上升的趋势,说明冬季望虞河水位较低时,望虞河沿程污染物质仍然会呈现累积态势,但入湖水体各形态磷素浓度总体并不高于太湖湖心区,冬季望虞河西岸控制工程的运行效果总体达到望虞河入湖水质要求。

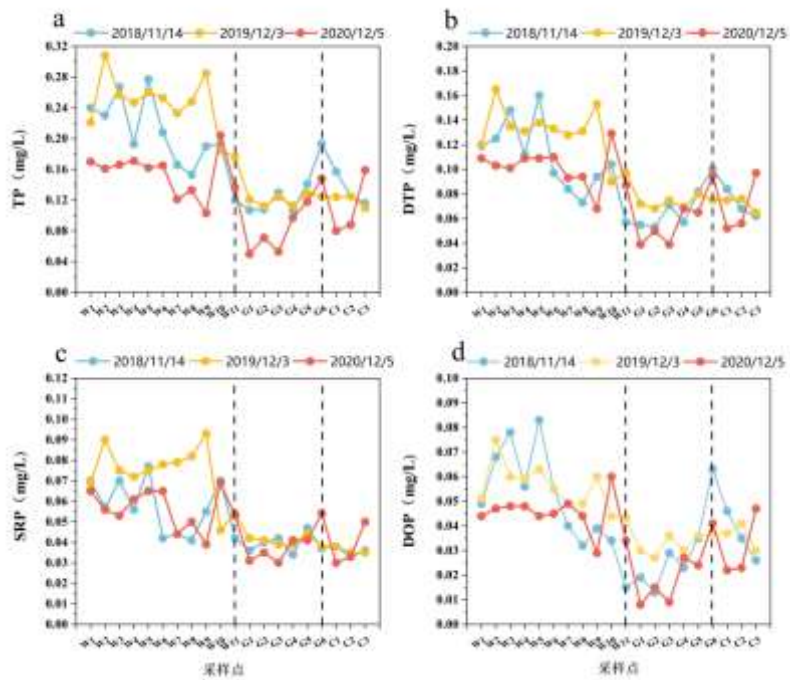


图 2 2018—2022 年秋季引水期（2018 年 11 月 14 日、2019 年 12 月 3 日）和非引水期（2020 年 12 月 5 日）望虞河（W1-W11）、贡湖湾（G1-G6）以及湖心区（C1-C3）水体 4 种形态磷素空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of four phosphorus forms in the Wangyu River (W1-W11), Gonghu Bay (G1-G6), and the lake center (C1-C3) during autumn water diversion and non-diversion periods (2018-2022)

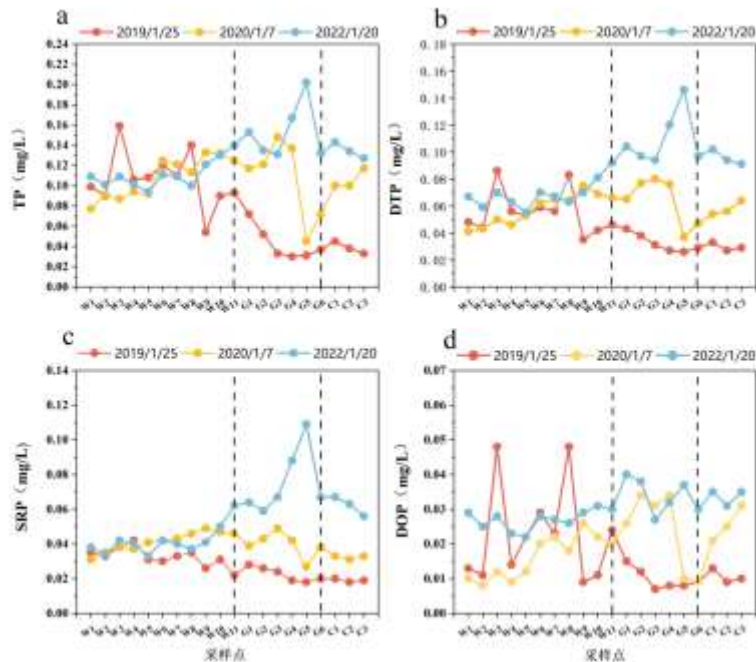


图 3 2018—2022 年冬季引水期（2020 年 1 月 7 日黄色和 2022 年 1 月 20 日蓝色）与非引水期（2019 年 1 月 25 日红色）望虞河（W1-W11）、贡湖湾（G1-G6）以及湖心区（C1-C3）水体 4 种形态磷素空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of four phosphorus forms in the Wangyu River (W1-W11), Gonghu Bay (G1-G6), and the lake center (C1-C3) during winter water diversion and non-diversion periods (2018-2022)

水体磷素组成的空间分布分析发现, 秋季与冬季引水期望虞河与贡湖湾水体 PP 浓度占 TP 浓度比例均显著高于非引水期 (One-way ANOVA, $p < 0.01$), 引水期望虞河至太湖方向的水体 PP 浓度占比呈现下降趋势 (图 4a, 4b, 4d, 4e)。长江下游水体 PP 浓度总体高于太湖^[29], 这是秋、冬季引水期望虞河和贡湖湾水体 PP 浓度占比高于非引水期的直接原因。引水与非引水期望虞河水体 SRP 浓度占比均显著低于贡湖湾与湖心区 (One-way ANOVA, $p < 0.05$, 图 4c, f), 而引水与非引水期之间望虞河水体 SRP 浓度占比无显著性差异。望虞河水体 DOP 浓度比例均值低于太湖水体 (One-way ANOVA, $p < 0.05$), 尤其是在引水期。望虞河至太湖方向, 水体 DOP 浓度比例呈现增加的趋势, 这与富营养化太湖水体中有机物质含量高有关。此前的研究也表明, 望虞河引水可有效改善贡湖湾水体有机污染状况^[39]。综上所述, 本研究数据显示, 在望虞河西控工程运行背景下, 多数情况下望虞河入湖磷素浓度与湖心区无显著差异, 甚至在部分时段更优, 枯水季引水对太湖溶解性生物有效磷的净贡献并不显著, 但仍存在外源输入风险。

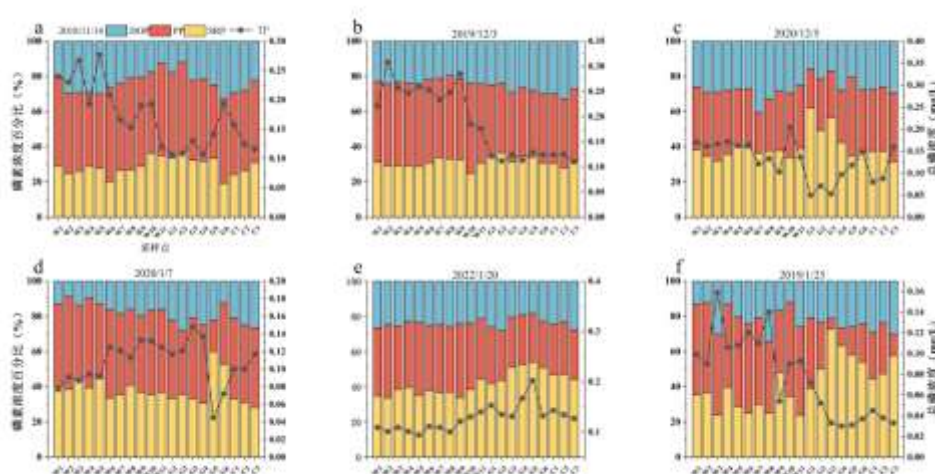


图 4 秋(a、b、c)、冬(d、e、f)季引水与非引水期 (2020 年 12 月 5 日、2019 年 1 月 25 日) 望虞河 (W1-W11)、贡湖湾 (G1-G6) 以及湖心区 (C1-C3) 水体 4 种形态磷素占 TP 比例的空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of the relative abundance of four phosphorus forms to total phosphorus (TP) in the Wangyu River (W1-W11), Gonghu Bay (G1-G6), and the lake center (C1-C3) during specific autumn(a、b、c)and winter(d、e、f)operation periods (2019-2020)

2.2 引水与非引水期受水河湖水体磷素差异

秋季引水期望虞河水体 TP 浓度显著高于非引水期 (One-way ANOVA, $p < 0.001$, 图 5a), 而溶解态磷浓度差异均不显著 (图 5b, c, d)。秋季引水期贡湖湾 TP 浓度也显著高于非引水期 (One-way ANOVA, $p < 0.05$, 图 5a), 其他溶解态磷浓度差异均不显著 (图 5b, c, d)。秋季引水期与非引水期太湖湖心区水体 4 种形态磷素浓度差异均不显著 (图 5)。冬季引水与非引水期望虞河 TP 浓度差异不显著 (图 5a), 但引水期 SRP 浓度显著高于非引水期 (One-way ANOVA, $p < 0.001$, 图 5b)。引水期与非引水期贡湖湾水体 4 种磷素浓度均存在极显著差异 (One-way ANOVA, $p < 0.001$, 图 5), 而太湖湖心区所有磷形态浓度均存在显著差异 (图 5a-d)。秋季引水对望虞河水体 TP 影响显著, 但对贡湖湾的可溶性磷等生物有效磷的影响有限。冬季引水与非引水期贡湖湾水体 4 种磷素形态均呈现极显著差异 (One-way ANOVA, $p < 0.001$, 图 5)。

长江水体 TP 浓度通常高于望虞河和太湖水体, 但主要受长江水体中较高比例的 PP 影响^[10], 本研究也证实了这点。秋季引水期贡湖湾 TP 浓度显著高于非引水期, 这与长江来水磷素组成有关, 即长江水体携带的大量悬浮颗粒物所结合的颗粒态磷 (PP) ^{[10][29]}。本研究中, 秋季引水期贡湖湾水体 PP 浓度占比均值 (47.0%) 高于非引水期 (37.33%) (图 4)。这表明, 引水期间, 尽管望虞河沿程对磷素有净化作用, 但较高比例的 PP 形态磷素进入贡湖湾后, 也可能导致该区域水体 TP 浓度升高。同时, 本研究发现, 秋季引水期贡湖湾 TP 浓度显著高于非引水期, 但并未显著高于引水期的湖心区 (图 5a), 秋季

引水期湖心区总磷浓度也处在较高水平，并不低于贡湖湾（图 2），证明太湖湖心区对于贡湖湾的内源影响同样不容忽视。本研究也发现，秋季引江对太湖贡湖湾水体中溶解态磷素浓度的影响并不显著，这表明，秋季引江下太湖贡湖湾水体可供浮游藻类等直接利用的磷素浓度并未得到显著增加。实际上，引江济太工程运行初期，受望虞河沿线入河污染以及望虞河本身自净能力影响，入湖水体磷素浓度往往较高，但随着近年来望虞河西控工程等治污工程的实施和运行，望虞河入湖水体 TP 浓度能够达到地表水环境质量的 III 类标准^[40]。目前，枯季望虞河引江对太湖水体磷素的负面影响并不显著。此外，虽然冬季引水期贡湖湾 SRP 浓度显著高于非引水期，但同期太湖湖心区水体 SRP 浓度也显著高于非引水期，且与贡湖湾 SRP 浓度并无显著差异（图 5b），说明目前的引水规模尽管可以影响太湖局部水域磷素浓度，但太湖水体较高的 SRP 本底浓度对贡湖湾的影响可能更为重要。

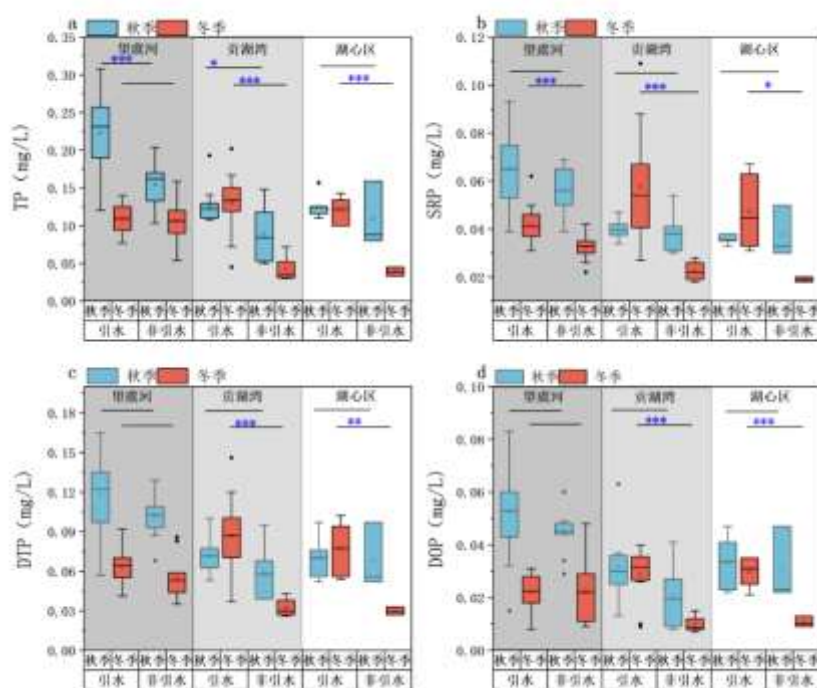


图 5 秋、冬季引水与非引水期研究区域 TP (a)、SRP (b)、DTP (c)、DOP (d) 浓度对比图
(One-way ANOVA, $p \leq 0.05$: *, $p \leq 0.01$: **, $p \leq 0.001$: ***)

Fig.5 Variations in the concentrations of TP, (a), SRP(b), DTP(c), and DOP(d) under different water operation conditions during autumn and winter (One-way ANOVA, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$)

2.3 枯季“引江济太”对贡湖湾水体磷素贡献分析

本研究发现，秋季引水期望虞河输水过程对长江来水磷素具有不同程度的削减作用，入湖 TP 平均浓度较长江来水降低了 35.8%（图 6a）。DTP 和 DOP 的降幅尤为突出，入湖浓度分别为 $0.077 \pm 0.02 \text{ mg/L}$ 和 $0.029 \pm 0.014 \text{ mg/L}$ ，较长江来水分别降低了 35.6% 和 42.0%。相比之下，SRP 的降幅略小，入湖浓度 ($0.048 \pm 0.006 \text{ mg/L}$) 较长江来水 (0.0695 mg/L) 降低了 30.9%。望虞河入湖 TP 平均浓度 ($0.148 \pm 0.028 \text{ mg/L}$) 与贡湖湾 ($0.126 \pm 0.023 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.126 \pm 0.015 \text{ mg/L}$) 并无显著性差异 (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。望虞河入湖 SRP 浓度 ($0.048 \pm 0.006 \text{ mg/L}$) 也与贡湖湾 ($0.040 \pm 0.003 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.036 \pm 0.002 \text{ mg/L}$) 无显著性差异 (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。望虞河入湖 DTP 浓度 (0.077 mg/L) 也并未显著高于贡湖湾 ($0.071 \pm 0.012 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.072 \pm 0.007 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)，与 TP 和 SRP 一致。望虞河入湖 DOP 浓度 ($0.029 \pm 0.014 \text{ mg/L}$) 略低于贡湖湾 ($0.032 \pm 0.012 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$) 与太湖湖心 ($0.036 \pm 0.007 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。对于冬季引水期（图 6b），望虞河入湖 TP 平均浓度 ($0.133 \pm 0.008 \text{ mg/L}$)

较长江来水 ($0.093 \pm 0.016 \text{ mg/L}$) 增加了 42.5%。入湖水体 SRP 平均浓度 (0.054 mg/L) 较长江来水 ($0.035 \pm 0.004 \text{ mg/L}$) 增加了 56.5%，增幅明显。入湖 DTP 和 DOP 平均浓度 ($0.079 \pm 0.013 \text{ mg/L}$, $0.025 \pm 0.005 \text{ mg/L}$) 较长江来水 ($0.054 \pm 0.008 \text{ mg/L}$, $0.02 \pm 0.009 \text{ mg/L}$) 分别增加了 46.3% 和 28.2%。望虞河入湖 TP 平均浓度 ($0.133 \pm 0.008 \text{ mg/L}$) 与贡湖湾 ($0.130 \pm 0.039 \text{ mg/L}$) 基本持平，但低于太湖湖心区 ($0.135 \pm 0.007 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。望虞河入湖 SRP 平均浓度 ($0.054 \pm 0.008 \text{ mg/L}$) 低于贡湖湾 ($0.058 \pm 0.022 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.062 \pm 0.005 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。入湖 DTP 平均浓度 ($0.079 \pm 0.013 \text{ mg/L}$) 低于贡湖湾 ($0.087 \pm 0.029 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.096 \pm 0.005 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。入湖 DOP 平均浓度 ($0.025 \pm 0.005 \text{ mg/L}$) 低于贡湖湾 ($0.029 \pm 0.01 \text{ mg/L}$) 和太湖湖心区 ($0.034 \pm 0.002 \text{ mg/L}$) (Mann-Whitney U 检验, $p > 0.05$)。

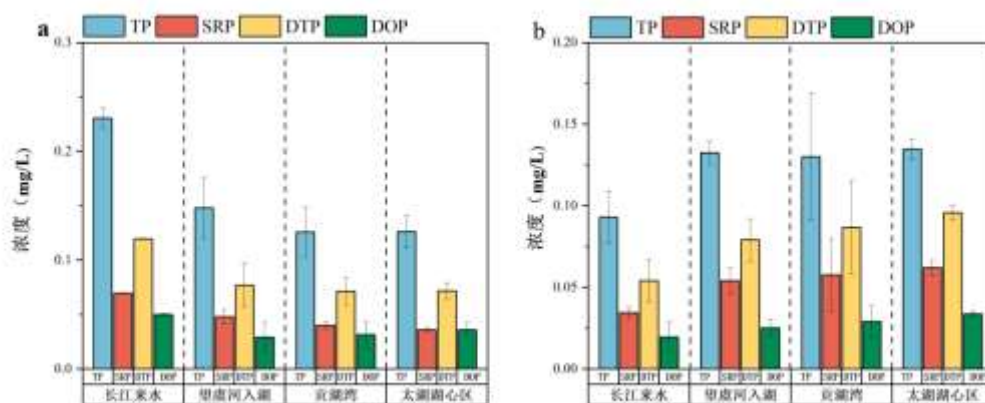


图 6 秋季(a)和冬季(b)引水期间长江来水、望虞河入湖、贡湖湾水体以及太湖湖心区水体磷素浓度比较

Fig.6 Spatial variations in phosphorus concentrations from the Yangtze River to the central Taihu Lake via the Wangyu River and Gonghu Bay during the autumn (a) and winter (b) water diversion period

秋、冬季引水期长江来水、望虞河入湖、太湖贡湖湾以及湖心区 4 个研究水域的多形态磷素的差异性检验结果表明，枯季望虞河“引江济太”并不会显著增加受水湖区水体磷素负荷，尤其是对于浮游藻类可直接利用的溶解态生物有效磷。此前的研究多认为，引江入湖会显著增加太湖水体磷素负荷，只是相对于太湖流域湖西片入湖河流而言，望虞河入湖水水质相对较优。据报道，作为望虞河的直接受水区，贡湖湾的磷浓度低于太湖湖心区和梅梁湾^{[41] [43]}。从溶解性生物有效磷视角来看，当前枯季望虞河引江入湖并未加重太湖磷素负荷。但枯水季引水对太湖磷负荷的贡献，特别是颗粒态磷在湖底的累积，也可能存在生态风险。因此，从湖泊富营养化治理的长期目标来看，持续优化引水水质、进一步降低入湖磷通量，仍是“引江济太”发挥更大生态环境效益的关键。

2.4 贡湖湾水体 Chl.a 浓度与磷素及其他环境因子关联分析

皮尔逊相关性分析发现，秋季引水期贡湖湾水体 Chl a 浓度仅与水温 ($p < 0.05$) 和浊度 ($p < 0.05$) 呈显著相关，与磷素及其他环境因子无显著相关性 (图 7a)。DTP ($p < 0.01$) 和 DOP ($p < 0.05$) 则与 DO 存在显著相关。秋季非引水期 Chl a 与各环境因子均无显著相关性 (图 7b)。值得注意的是，4 种形态磷素均与 DO、浊度显著相关，其中 TP 和 PP 与水体浊度的相关性尤为显著，这与水体悬浮颗粒物对浊度的贡献有关^[44]。冬季引水期 Chl a 仅与 DO ($p < 0.01$) 和 pH ($p < 0.01$) 显著相关 (图 7c)。TP ($p < 0.05$) SRP ($p < 0.01$) 以及 DTP ($p < 0.05$) 均与 pH 显著相关。冬季非引水期 Chl a 与各形态磷素无显著相关性，但与浊度 ($p < 0.01$) 和 DO ($p < 0.05$) 存在显著相关 (图 7d)。

秋季引水期贡湖湾水体 Chl a 与水温、浊度相关，冬季则转为与 DO、pH 显著相关，反映出藻类对磷的利用效率受到多重环境因子调控，而非单一磷输入量的直接影响^[45]。本研究也提示，作为望虞河“引江济太”的直接受水湖区，贡湖湾的浮游藻类增殖对水体磷素响应并不敏感，贡湖湾浮游藻类的增殖在枯水季可能并不受到磷限制，也即枯季引水期望虞河入湖磷素对贡湖湾浮游藻类增殖的贡献不明显。此外，本研究发现，与以往聚焦外源调水或沉积物直接释放的研究不同^{[46] [47]}，贡湖湾水体磷素动态表现

出与太湖湖心区的同步性（图 2 和 3），这表明贡湖湾磷素变化更多受到太湖内部磷循环过程的影响，包括沉积物-水界面磷释放、水动力扰动及内源转化等^{[48][50]}。此外，本研究只关注枯水季“引江济太”磷素影响。在此期间，尤其是冬季，水温较低，Chl a 与水温呈现负相关，浮游藻类多处于休眠或低活性状态，其生长繁殖主要受制于温度和光照等物理环境因子，而对营养盐的响应相对迟缓。但是在秋季在太湖仍有藻华发生，外源磷输入藻类生长存在的潜在影响不容忽视。这一潜在影响，特别是所输入的生物有效磷在沉积物-水爆发的累积与转化，可能在后续水温回升引起藻华暴发。

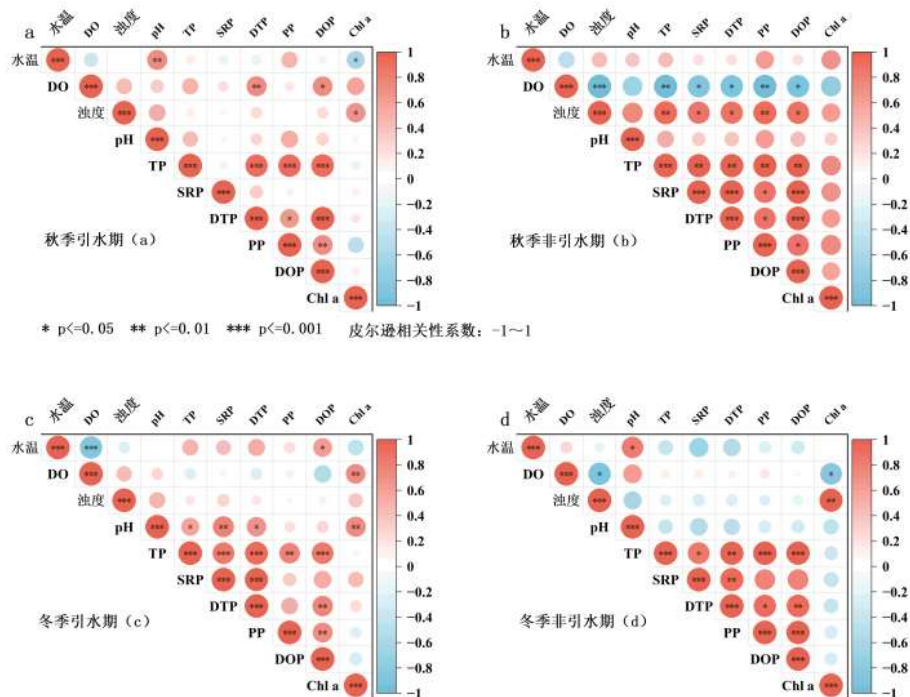


图 7 秋(a、b)、冬(c、d)季引水与非引水期贡湖湾水体 Chl.a 与各形态磷素以及其他环境因子之间的相关性

Fig.7 Pearson correlation analysis of Chl.a with various phosphorus forms and other environmental factors in Gonghu Bay during autumn (a、b)and winter(c、d) under water diversion and non-diversion conditions.

4 结论

(1) 秋季引水期，望虞河从长江至太湖方向水体磷素总体呈下降趋势，贡湖湾至湖心区方向水体磷素表现为波动上升；冬季引水期，望虞河从长江至太湖方向水体磷素则呈波动上升趋势。

(2) 枯季引水期贡湖湾水体 PP 浓度占比高于非引水期（冬季引水期占比平均值为 37.33%，非引水期占比平均值为 20.16%、秋季引水期占比平均值为 47%，非引水期占比平均值为 31.5%），但望虞河入湖水体磷素浓度总体达到甚至低于湖心区，本研究监测期间枯季引水对贡湖湾水体磷素的影响并不显著，尤其是溶解性生物有效磷。

(3) 在望虞河西控工程有效运行的前提下，枯水季短期调水不会显著提升贡湖湾的水体磷素负荷，尤其是溶解态生物有效磷；同时，枯水季贡湖湾浮游藻类增殖对水体磷素的响应也不敏感。但调水所引入的外源磷尤其是颗粒态磷在湖泊中的长期累积效应仍需长期观测与深入研究。

5 参考文献

- [1] Mei YK, Su YL, Dong ZG *et al.* Ecological restoration impacts on water quality and carbon-related greenhouse gas emissions: A case study of Lake Xuanwu, Nanjing. *J. Lake Sci.*, 2025,37(6):1978-1987. DOI: 10.18307/2025.0618 . [梅彦昆,苏雅玲,董志国等.富营养化浅水湖泊生态修复对水质与含碳温室气体通量的影响—以南京玄武湖为例. 湖泊科学, 2025,37(6):1978-1987.]
- [2] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake. *Science*, 2007, 317(5842): 1166. DOI:10.1126/science.317.5842.1166.

- [3] Yang ZX, Li YX, Zhu GW *et al.* Control factors of cyanobacterial bloom area in Lake Taihu, China (2003-2023). *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3): 734-751. [杨芷萱, 黎云祥, 朱广伟等. 2003—2023 年太湖蓝藻水华面积变化的影响因子分析. 湖泊科学, 2025, 37(3): 734-751.]
- [4] Tilman D, Kilham SS, Kilham P. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, 13: 349-372. DOI:10.1146/annurev.es.13.110182.002025.
- [5] Wang HZ, Wang HJ, Li Y *et al.* Management of lake eutrophication: targeted phosphorus control or combined nitrogen-phosphorus control? *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 938-960. [王洪铸, 王海军, 李艳等. 湖泊富营养化治理:集中控磷,或氮磷皆控? 水生生物学报, 2020, 44(5): 938-960.]
- [6] Li Y, Acharya K, Yu Z *et al.* Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 325-334. DOI:10.1016/j.ecoleng.2010.11.024.
- [7] Li Y, Tang C, Wang C *et al.* Improved Yangtze River diversions: Are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? *Ecological Engineering*, 2013, 51: 104-116. DOI:10.1016/j.ecoleng.2012.12.077.
- [8] Yao X, Zhang L, Zhang Y *et al.* Water diversion projects negatively impact lake metabolism: A case study in Lake Dazong, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 613-614: 1460-1468. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.06.130.
- [9] Dai J, Wu S, Wu X *et al.* Effects of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu on the phytoplankton habitat of the Wangyu River channel. *Water*, 2018, 10: 759. DOI:10.3390/w10060759.
- [10] Pan XX, Ma YQ, Qin YW *et al.* Nutrients input characteristics of Yangtze River and Wangyu River during the ‘Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River’. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2800-2808. [潘晓雪, 马迎群, 秦延文等. “引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究. 环境科学, 2015, 36(8): 2800-2808.]
- [11] Yang QQ, Wu SQ, Wu XF *et al.* Simulation study of water diversion with different trophic levels effects on the water quality and phytoplankton community in Gonghu Bay. *China Rural Water and Hydropower*, 2024, (8): 8-17. [杨倩倩, 吴时强, 吴修锋等. 不同营养水平调水对贡湖湾湖区水质及浮游藻类影响的模拟研究. 中国农村水利水电, 2024, (8): 8-17.]
- [12] Peng F, Li K, Liang R *et al.* Shallow lake water exchange process before and after water diversion projects as affected by wind field. *Journal of Hydrology*. 2021a. 592 (Feb): 125785. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125785.
- [13] Hu L, Hu W, Zhai S *et al.* Effects on water quality following water transfer in Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 2010. 36 (4): 471-481. DOI:10.1016/j.ecoleng.2009.11.016.
- [14] 王小雨. 底泥疏浚和引水工程对小型浅水城市富营养化湖泊的生态效应[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2008.
- [15] Ling H, Wu D, Tan DX *et al.* Causes and countermeasures of total phosphorus rise in Taihu Lake during recent years. *Environmental Science and Technology*, 2018, 31(6): 54-56. [凌虹, 吴丹, 谭东炬等. 近年太湖总磷浓度上升的原因与对策分析. 环境科学与技术, 2018, 31(6): 54-56.]
- [16] Yang QQ, Wu SQ, Dai JY *et al.* Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 34-43. [杨倩倩, 吴时强, 戴江玉等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响. 湖泊科学, 2018, 30(1): 34-43.]
- [17] 闻欣, 邱利, 章双双等. “引江济太”入湖污染物通量及其对太湖水质贡献. 四川环境, 2014, 33(5): 67-71.
- [18] Zhuang Y, Gu BY, Zhang HJ *et al.* Influence of ‘Water Diversion Project from Yangtze River to Taihu Lake’ on total phosphorus of sediment and water quality in northern Taihu Lake. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(4): 111-117. [庄严, 顾蓓瑜, 张虎军等. “引江济太”对太湖北部底质及水质总磷的影响. 中国环境监测, 2021, 37(4): 111-117.]
- [19] Zhu W, Hu SY, Feng GY *et al.* Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016. *Journal of Lake Sciences*. 2020, 32(2): 325-336. [朱伟, 胡思远, 冯甘雨等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响:以 2016 年太湖为例. 湖泊科学, 2020, 32(2): 325-336.]
- [20] Zhai SH, Zhou Y, Cheng YH *et al.* Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015-2016. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1): 48-57. [翟淑华, 周娅, 程媛华等. 2015-2016 年环太湖河道进出湖总磷负荷量计算及太湖总磷波动分析. 湖泊科学, 2020, 32(1): 48-57.]
- [21] Huang XY, Hu ZB, Ye C *et al.* Nitrogen and phosphorus contents of aquatic plants and correlation analysis with water quality in

- confluence areas of rivers and lakes of Taihu Lake. *Environmental Engineering*, 2019, 37(9): 74-78. [黄晓懿, 胡展搏, 叶春等. 太湖湖交汇区水生植物氮磷含量与水质相关性分析. 环境工程, 2019, 37(9): 74-78.]
- [22] Tan L, Wang W, Wang Z *et al.* Optimizing water transfer rules of a drinking water source reservoir considering water quality, quantity, and ecosystem, *Journal of Hydrology*, 2025, 663: 0022-1694. DOI:10.1016/j.jhydrol.2025.134227.
- [23] Xu R, Pang Y, Hu Z *et al.* Influence of water diversion on spatial and temporal distribution of flow field and total phosphorus (TP) concentration field in Taihu Lake. *Water: Supply*. 2020, 20(3): 1059-1071. DOI:10.2166/ws.2020.031
- [24] Zeng Q, L Qin, and X Li. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll A of the receiving water system. *Science of the Total Environment*, 2015a. 536 (Dec): 675 - 686. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.07.042.
- [25] Zhang M, A. Dolatshah, W Zhu, and G Yu. Case study on water quality improvement in Xihu Lake through diversion and water distribution. *Water*, 2022, 10(3): 333. DOI:10.3390/w10030333.
- [26] Du M Y, Yu Y, Yang Z, Chen F Z, Zhang M, Rui Q, Kong F X. Characteristics of plankton community structure during the dry season of 2012 in the Lake Taihu Basin . *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(5): 724-734.[杜明勇, 于洋, 阳振, 陈非洲, 张民, 芮琪, 孔繁翔. 太湖流域2012年枯水期浮游生物群落结构特征 . 湖泊科学, 2014, 26 (05): 724-734.]
- [27] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age . *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29 (1) : 22-31.D0I: 10.18307/2017.0103. [黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响.湖泊科学, 2017, 29 (1) : 22-31.]
- [28] 蒋新新, 李鸿, 曹小洁. 太湖自动监测站水质分析及影响评价. 水利信息化, 2009, (4): 43-46+50.
- [29] Zhu W, Xue ZP, Zhang YM *et al.* Effect of water diversion from the Yangtze River to Lake Taihu on total phosphorus rebound after 2016. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1432-1445. [朱伟, 薛宗璞, 章元明等. “引江济太”对2016年后太湖总磷反弹的直接影响分析. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1432-1445.]
- [30] Ma Q, Tian W, Wu CM. Total phosphorus and total nitrogen concentrations of the water diverted from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2): 207-212. [马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析. 湖泊科学, 2014, 26(2): 207-212.]
- [31] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [32] Jespersen AM, Christoffersen K. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Archiv für Hydrobiologie*, 1987, 109(3): 445-454. DOI: 10.1127/archiv-hydrobiol/109/1987/445.
- [33] Lv S, Zhang JQ, Ni H *et al.* Study on the coupling relationship of low temperature fluidity and oxidation stability of biodiesel. *Applied Sciences*, 2020, 10. DOI: 10.3390.
- [34] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: *R Foundation for Statistical Computing*, 2014.
- [35] Wickham H. ggplot2: elegant graphics for data analysis. New York: *Springer-Verlag*, 2009.
- [36] Wood S. The mgcv package. www.r-project.org, 2007.
- [37] Wang PF, Hu B, Wang C *et al.* Interception and decontamination of phosphorus in input watercourse with lake wetland. *Water Resources Protection*, 2013, 29(1): 1-5+9. [王沛芳, 胡斌, 王超等. 湖荡湿地对输水河道磷的截留净化作用. 水资源保护, 2013, 29(1): 1-5+9.]
- [38] 李茜, 逢勇, 罗缙. 望虞河西岸控制工程对望虞河西岸地区水环境影响及对策研究. 广东化工, 2018, 45(15): 141-142+146.
- [39] Huang CL, Li X, Sun YY. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1): 22-31. DOI:10.18307/2017.0103. [黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”对其的影响. 湖泊科学, 2017, 29(1): 22-31.]
- [40] Dai JY, Wu SQ, Wu XF *et al.* Impacts of a large river-to-lake water diversion project on lacustrine phytoplankton communities. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124938. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124938.
- [41] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 957-973. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 太湖磷浓度变化及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, 33(4): 957-973.]

- [42] 水利部太湖流域管理局. 2020 年太湖健康状况报告. 2020.
- [43] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005 - 2018: implications for future phosphorus reduction target management. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1): 21-35. [朱广伟, 邹伟, 国超翔等. 太湖磷浓度与负荷长期变化(2005 - 2018)及对磷减排目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, 32(1): 21-35.]
- [44] 钱华. 巢湖水体中浊度与营养盐参数的相关性分析. 科学技术创新, 2023, (20): 62-66.
- [45] Deng WW, Wang R, Liu ZW *et al.* The Influencing Factors of Critical Transition in Shallow Lakes Revealed by Model. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 83-94. [邓文文, 王荣, 刘正文等. 模型揭示的浅水湖泊稳态转换影响因素分析. 地球科学进展, 2021, 36(1): 83-94.]
- [46] Yi YJ, Wei Z, Guo YM *et al.* Simulations of influence of different water transfer methods on water quality in Chaohu Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(9): 1-12. [易雨君, 魏震, 郭玉明等. 不同调水方式对巢湖水质影响模拟. 水力发电学报, 2024, 43(9): 1-12.]
- [47] Xu ZP, Zhu X, Hou J *et al.* Influence of different water transfer schemes on the water dynamics and water quality of Shahu Lake. *Environmental Protection Science*, 2024, 50(2): 94-102. [徐志鹏, 朱翔, 侯俊等. 不同调水方案对沙湖水动力及水质影响研究. 环境保护科学, 2024, 50(2): 94-102.]
- [48] Gao YX, Sun XJ, Zhang ZP *et al.* Simulated study on concentration change of different form phosphorus in shallow lakes caused by wind-wave disturbance. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 668-673. [高永霞, 孙小静, 张战平等. 风浪扰动引起湖泊磷形态变化的模拟试验研究. 水科学进展, 2007, 18(5): 668-673.]
- [49] Chen J, Xu H, Zhan X *et al.* Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment-water interface. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 907-918. [陈洁, 许海, 詹旭等. 湖泊沉积物-水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法. 湖泊科学, 2019, 31(4): 907-918.]
- [50] 郭敏丽. 颗粒有机物矿化驱动磷释放的光化学机制及其环境效应研究[学位论文].武汉: 华中农业大学, 2024.